



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1  
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม  
Evaluation of Flexural Strength and Ductility of  
Corroded Reinforced Concrete Beams

โดย

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## บทคัดย่อ

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กของแท่งเหล็กที่เสียไว้ในแท่งคอนกรีตด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าตรงจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าไปที่แท่งเหล็กขนาดต่างๆ ที่เสียไว้ในแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ให้ขั้วบวกของเครื่องจ่ายไฟฟ้าต่อเข้ากับแท่งเหล็กที่ต้องการให้เกิดสนิมเรียกว่า ขั้วอโนด ส่วนขั้วลบของเครื่องจ่ายไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าขั้วแคโทด ให้ต่อเข้ากับแท่งเหล็กเปลี่ยนที่แช่ไว้ในสารละลายที่นำไฟฟ้า ในกรณีนี้ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ คอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 210 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดเหล็กที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย RB9 DB12 DB16 DB20 และ DB25 โดยแบ่งระดับการเกิดสนิมของเหล็กออกเป็น 3 ระดับ คือ 15%, 30% และ 50% ของปริมาณเหล็กเสริมเริ่มต้น ดังนั้นจำนวนแท่งคอนกรีตทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 135 ตัวอย่าง เมื่อแท่งเหล็กขนาดต่างๆ เกิดสนิมเหล็กถึงระดับที่กำหนดไว้จะนำแท่งคอนกรีตมาทำการกระแทกแตกเพื่อนำเหล็กที่เกิดสนิมมาล้างทำความสะอาด และนำไปชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่ เพื่อนำมาคำนวณหาน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไป จากนั้นเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักเทียบกับค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปด้วยการคำนวณจากสมการพาราเดย์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กของแท่งเหล็กที่เสียไว้ในแท่งคอนกรีตด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี สามารถจำลองพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมได้ดี เมื่อระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมนานขึ้น ปริมาณน้ำหนักของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านแท่งเหล็ก แต่ส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น จึงสรุปว่าเมื่อคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น อาจช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมที่เสียอยู่ในแท่งคอนกรีตในช่วงต้นๆ ของขบวนการเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามเมื่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว ค่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่มีผลทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาน้อยลงแต่อย่างไร ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมจากทางทฤษฎีและการทดลองมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการหาน้ำหนักเหล็กเสริมที่เหลืออยู่จากการชั่งน้ำหนักเกิดข้อผิดพลาดขึ้นจากเศษปูนที่ติดอยู่กับผิวเหล็ก สมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปได้ดีพอสมควรสำหรับเหล็กขนาดเล็กกว่า DB12 อย่างไรก็ตามไม่สามารถสรุปได้ว่าสมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปเมื่อเหล็กมีขนาดใหญ่กว่า DB12

คำสำคัญ: เซลล์ไฟฟ้าเคมี, การเร่งปฏิกิริยาสนิม, สนิมเหล็ก, สมการพาราเดย์, คอนกรีตเสริมเหล็ก

## Abstract

The project is aimed to investigate corrosion in steel using electrochemical cell named as Electrolytic Cell. Steels that need to be corroded were casted in cylinder concretes with diameter of 10 cm and height of 20 cm. Positive wires of a direct current generator were mounted to the steel rods in order to induce corrosion by oxidation reaction. This electrode is known as Anode. The other wires, negative, were attached to the steel rods that submerged in an electrolyte named as NaCl. This negative electrode is known as Cathode. Strengths of concrete used in this study are 210, 280, and 350 ksc. Sizes of steel rods are RB9, DB12, DB16, DB20, and DB25. Levels of corrosion in steels are specified as 15%, 30%, and 50% of their original weights. Total specimens tested in this study are 135. After corrosion reached the intended levels, the steel rods were removed from concretes and weighed. Weight losses of corroded steels calculated from measurement and computed from Faraday's Equation were compared.

The results show that Electrolytic Cell can resemble corrosion actions of steels in concretes such as concrete cracking, steel swelling etc. The longer corrosion reaction allows, the higher amount of weight loss of steels can be determined. No clear evidence showing that the higher strength of concrete benefits in reducing of total amount of corrosion in steels. However, the result shows that the steels within the higher concrete strength might process longer time to initiate corrosion than within the lower concrete strength. The comparison of weight loss between balance measurement and Faraday's equation is inconclusive because of the process of cleaning of steel surfaces. However, Faraday's equation shows better correlation with balance measurement for steel with diameters less than 12 mm.

Keywords: Electrochemical Cell, Corrosion Reaction, Corrosion, Faraday's Equation, Reinforced Concrete

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2557 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต	3
2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	3
2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์	6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11

<b>บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	13
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
<b>บทที่ 4 การเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเสริมในตัวอย่างทรงกระบอก</b>	
4.1 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก	22
4.2 ตัวอย่างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเร่งปฏิกิริยาสนิม ของเหล็กเสริมในคอนกรีตรูปทรงกระบอก	23
4.3 ขั้นตอนการทดลองเร่งปฏิกิริยาคอนกรีตทรงกระบอก	25
<b>บทที่ 5 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคอนกรีตรูปทรงกระบอก</b>	
5.1 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคอนกรีตรูปทรงกระบอก	30
<b>บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	52
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	54

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 3.1	ขนาดคละของหิน	13
ตารางที่ 3.2	ขนาดคละของทราย	15
ตารางที่ 4.1	จำนวนตัวอย่างและขนาดเหล็กที่ใช้ทำการทดลอง การเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมเสริม	21
ตารางที่ 4.2	อัตราส่วนผสมคอนกรีตของตัวอย่างทรงกระบอก	21
ตารางที่ 4.3	ค่าเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณและการกดกำลังอัด จากเครื่องทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก	23
ตารางที่ 5.1	พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ )	33
ตารางที่ 5.2	พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ )	35
ตารางที่ 5.3	พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ )	37
ตารางที่ 5.4	น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ )	39
ตารางที่ 5.5	น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ )	42
ตารางที่ 5.6	น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ )	45

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
รูปที่ 2.2 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten (NaCl)	9
รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33	14
รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่างๆ ของทรายเทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33	16
รูปที่ 3.3 เหล็กเสริมที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบ	16
รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง	17
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมคอนกรีต	17
รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์เร่งปฏิกิริยา	18
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงอัด	19
รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	19
รูปที่ 4.1 การทดสอบกำลังอัดตัวอย่าง	22
รูปที่ 4.2 คอนกรีตทรงกระบอกที่เสียบเหล็กขนาด RB9 DB12 DB16 DB20 DB25	24
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการเร่งกระแสไฟฟ้าคอนกรีตรูปทรงกระบอก	26
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการจัดเรียงตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้า	26
รูปที่ 4.5 ภาพตัวอย่างการนำค่าไปใช้ในโปรแกรม Graphical Analysis	27
รูปที่ 4.6 การกดด้านข้างของตัวอย่างเพื่อนำเอาเหล็กออก	28



## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเหล็กที่ออกมาจากคอนกรีตทรงกระบอก	28
รูปที่ 4.8 เหล็กที่ผ่านการทำความสะอาดและกัดสนิม	29
รูปที่ 5.1 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	48
รูปที่ 5.2 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	48
รูปที่ 5.3 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	49
รูปที่ 5.4 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับเหล็ก RB9	49
รูปที่ 5.5 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับเหล็ก DB12	50
รูปที่ 5.6 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับเหล็ก DB16	50
รูปที่ 5.7 เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับเหล็ก DB20	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.8 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจาก การชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการสำหรับเหล็ก DB25	51

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

ประเทศไทยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างหลักที่ใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างแทบทุกประเภทจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แม้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความคงทนแข็งแรงสูง ก็สามารถเกิดการเสื่อมสภาพได้ ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนานมักพบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นปัญหาซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ทำให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็กลดต่ำลง เมื่อเหล็กเสริมของคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมจะสามารถสังเกตเห็นได้เนื่องจาก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวหรือเกิดการปริแตกที่ผิวของคอนกรีต ดังนั้นการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเหล่านี้ ให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ และแต่ละวิธีการจะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไป ซึ่งหนึ่งในวิธีการซ่อมแซมเหล่านั้นคือ การซ่อมแซมโดยการใส่แผ่นไฟเบอร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาจากข้อดีของวิธีการนี้ เช่น สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ไม่เกิดปัญหาจากรูปร่างของโครงสร้าง มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง จึงนับว่าเป็นสิ่งที่ควรนำมาศึกษาอย่างยิ่ง

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของการสูญเสียความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคอนกรีต กับไอทะเลซึ่งมีทั้งสารประกอบซัลเฟตและสารประกอบคลอไรด์ เป็นสาเหตุให้คอนกรีตเสื่อมสภาพ และทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตที่ผิวเกิดการหลุดร่อน ปัญหาดังกล่าวนี้เป็นปัญหาหลักของโครงสร้างคอนกรีตที่สร้างอยู่ในน้ำทะเลหรือสร้างใกล้กับทะเล ซึ่งจะต้องเผชิญกับไอทะเล สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบคลอไรด์ เป็นระยะเวลายาวนานและต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น ตอหม้อ เสา คาน พื้น กำแพงกันของสะพาน อาคารจอดรถ หรือแม้แต่อาคารสูงที่ก่อสร้างในบริเวณหาดบางแสนก็ประสบกับปัญหานี้ ปัญหาการหลุดร่อนของผิวคอนกรีตนี้ทำให้เกิดคำถามอื่นๆตามมาเช่น ความปลอดภัยของโครงสร้าง ความสามารถในการใช้งานของโครงสร้างต่อไป รวมไปถึงวิธีการซ่อมแซม

โครงสร้างเหล่านี้นั้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้ด้วยความปลอดภัยและใช้งบประมาณในการซ่อมบำรุงรักษา เป็นไปอย่างประหยัดและเกิดประโยชน์สูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีในคานเสริมเหล็ก ที่มีขนาดใหญ่
- 2) เพื่อศึกษาการทำนายปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาการเร่งสนิมด้วย สมการพาราเดย์

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) นำเสนอวิธีการเร่งปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี เซลล์ไฟฟ้าเคมีในห้องปฏิบัติการ
- 2) คำนวณน้ำหนักเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมด้วยสมการพารา- เดย์
- 3) เปรียบเทียบน้ำหนักเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมที่คำนวณได้จาก สมการสมการพาราเดย์กับน้ำหนักเหล็กเสริมที่ได้จากการชั่งน้ำหนัก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาอุปกรณ์การเร่งปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย
- 2) ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผ่านกระแสไฟฟ้ากับปริมาณเหล็กที่สูญเสียไป
- 3) ทำให้ทราบพฤติกรรมคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิม

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

- 1) โดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การทรุดตัว การหดตัว
- 2) โดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอนเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด โดยซัลเฟตปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม
- 3) โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรีย
- 4) โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขีดสี การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ
- 5) โดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่มักเกิดกับคอนกรีตหลังจากสภาวะแข็งตัวแต่อย่างใดก็ดี ปัญหาอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสภาวะก่อนหน้านี้อาจสามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ สำหรับการศึกษาคำสั่งงานครั้งนี้ได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และการหลุดกะเทาะออกของเนื้อคอนกรีตเท่านั้น

### 2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) ได้นั้นคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) และอิเล็กตรอน ( $2e$ ) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 ถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กก็เป็นปัจจัย สำคัญของการควบคุมความเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ ก็ต่อเมื่อ เงื่อนไขทั้ง 3 ประการนี้ต้องเกิดขึ้น

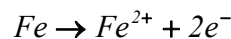
1. ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือ

แม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกการทำให้ความเป็นด่างลดลงโดยแต่ละสาเหตุจะได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไป

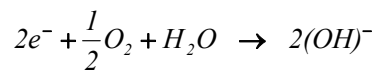
2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ อีออนของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

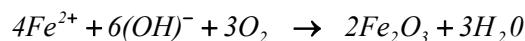
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (รูปที่ 2.1) ในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นด่างในบริเวณที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการต่อไปนี้



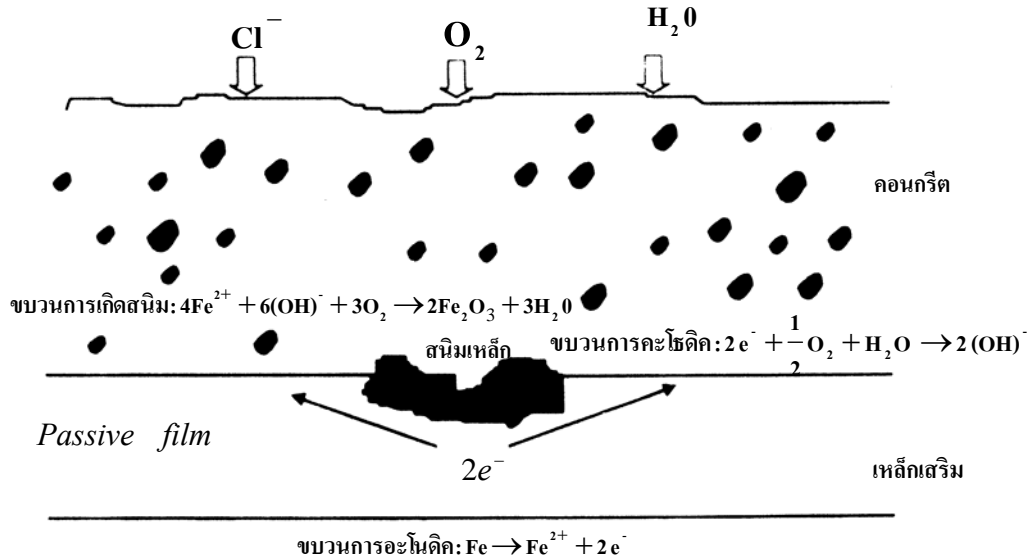
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอีออน ( $Fe^{2+}$ ) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น  $2e^{-}$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลอีออน ( $(OH)^{-}$ ) ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



โดยที่  $Fe_2O_3$  ก็คือเฟอริกออกไซด์ หรือ สนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งหมายความว่าสนิมอาจจะเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการคือ

- 1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลงเนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย ( $Fe^{2+}$ ) และอิเล็กตรอน ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง
- 2) การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fatigue Strength และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยึดหยุ่นก็จะลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย

## 2.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้เกิดความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท. 1014 - 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้สารละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary suction)
- 2) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นขอบคลอไรด์

สูงกว่าภายในของคอนกรีต

- 3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมแพร่ผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริม น้อยมาก

ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่าปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิมมิด (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนแปลงเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทั้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของ



คลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง ที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิว มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้ว คอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำ ทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจ ประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก มักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้ง นาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งให้ค่าความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

1) Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Fridel's salt) หรือ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite) หรือแม้แต้อยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดได้ด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลาย อยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวของคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะแวดล้อมเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีที่สภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากนั้นก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

การป้องกันการเกิดสนิมโดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม

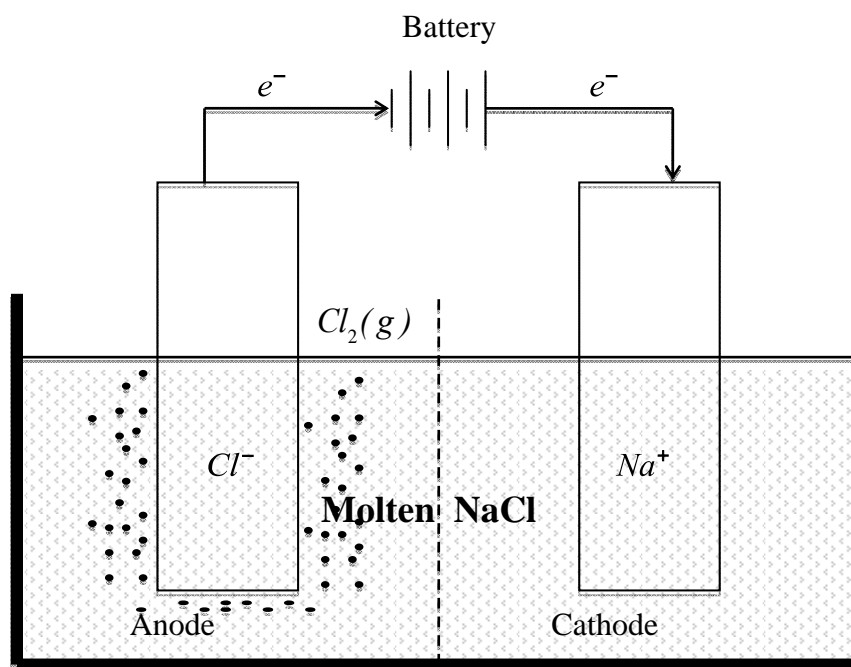
1) ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำจะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการแพร่จะน้อยลง ซึ่งจะกระทำได้โดย การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม การใช้สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม

2) ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต เช่น Epoxy เป็นต้น แต่มักมีราคาแพง

3) ใช้สารผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic) นั้นเกิดยากขึ้น

4) ใช้เหล็กเสริมที่ไม่เป็นสนิม หรือเคลือบผิวเหล็กเสริม แต่เป็นวิธีที่มีราคาแพงข้อเสนอนี้มีอีกประการหนึ่งคือ ต้องออกแบบคอนกรีตไม่ให้แตกร้าว เพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวจากการรับแรงหรือจากปัญหาอื่นๆ เช่น การหดตัวหรือถ้าเหล็กเลี้ยงไม่ได้ก็ต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวให้เล็กที่สุดเท่าที่ทำได้

## 2.5 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 2.2 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten (NaCl)

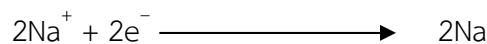
เนื่องจากโครงการวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาเกี่ยวกับการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสาเหตุจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จึงต้องมีการสร้างสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะใช้ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลด้วยวิธีการที่ใช้ระยะเวลาสั้น และให้ผลถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเพื่อให้ไอเล็คตรอนหลุดจากเหล็กจนทำให้เกิดสนิม (Electrolytic cells) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้ โดยมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 2.5.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cells)

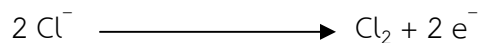
เซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ เซลล์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยสามารถแบ่งประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction ออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Galvanic Cells) และประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Voltaic Cells) สำหรับการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้ได้นำหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ แบบ Electrolytic Cells มาใช้ในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่ง Electrolytic Cells คือ หน่วย

เซลล์ซึ่งทำงานด้วยปฏิกิริยาเคมี และใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยา Oxidation และปฏิกิริยา Reduction) อย่างต่อเนื่อง โดย Electrolytic Cells มีหลักการทำงานดังนี้ จากหลักการของการแยกส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (The Electrolysis of Molten NaCl) เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะทำให้อะตอมของ  $\text{Na}^+$  วิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าลบ และอะตอมของ  $\text{Cl}^-$  จะวิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยเส้นประบริเวณกลางรูปใช้แทนวัสดุที่สามารถป้องกันการปะปนกันของ ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบโดยยอมให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึมผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

จากรูปที่ 2.2 เมื่ออะตอมของ  $\text{Na}^+$  ชนกับขั้วไฟฟ้าลบซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์มากเพียงพอ อะตอมของ  $\text{Na}^+$  จะเกิดปฏิกิริยา Reduction จนเปลี่ยนสภาพเป็น Sodium metal (Na) ดังสมการ



และเมื่ออะตอมของ  $\text{Cl}^-$  ชนกับขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation จนเปลี่ยนเป็นก๊าซคลอรีน ซึ่งก็คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกดังสมการ



โดยค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้  $\text{Cl}^-$  เกิดปฏิกิริยา Oxidation กลายเป็น  $\text{Cl}_2$  เท่ากับ  $-1.36\text{ V}$  และค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้  $\text{Na}^+$  เกิดปฏิกิริยา Reduction กลายเป็น Na เท่ากับ  $-2.71\text{ V}$

จากรูปที่ 2.2 จะพบว่าขณะเกิดกระบวนการ Electrolysis ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้าลบ ดังนั้นเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกของระบบนี้เข้ากับแหล่งเสริมของแท่งคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมมีหน้าที่เปรียบเสมือนขั้วไฟฟ้าบวกด้วยจึงทำให้เหล็กเสริมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับวัสดุที่ต่อเข้ากับขั้วลบซึ่งในกรณีนี้ใช้เหล็กประเภทเดียวกับเหล็กเสริมแต่ได้รับการเคลือบด้วยสารป้องกันการผุกร่อน (Epoxy และสีป้องกันสนิม) โดยทั้งนี้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันการปะปนกันของก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาได้สอดคล้องกับเงื่อนไขในการเกิดสนิมของเหล็กโดย

ทั้งนี้ปริมาณในการเกิดสนิมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้รับโดยปริมาณเหล็กเสริมที่หายไปสามารถคำนวณได้จากสมการฟาราเดย์

$$\Delta W = \frac{I \cdot t \cdot A_m}{Z \cdot F} \dots\dots\dots (1)$$

- เมื่อ  $\Delta W$  = น้ำหนักเหล็กที่หายไป (กรัม)  
 $I$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $t$  = ระยะเวลาเมื่อเหล็กเริ่มเกิดสนิม (วินาที)  
 $A_m$  = ค่าคงที่มวลอะตอมของโลหะ (=55.85 กรัม สำหรับเหล็ก)  
 $F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์)  
 $Z$  = 2

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ ต้องเก็บข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนดนำค่ามาคำนวณตามสมการและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักจริงของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การซ่อมแซมเสาที่ได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อนด้วย FRP [4] เอกสารนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประสิทธิภาพของแผ่นไฟเบอร์ (FRP) ที่นำมาใช้ซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนโดยทำการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และทำการจำลองสภาวะการกัดกร่อนในธรรมชาติที่เกิดกับคอนกรีตด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าและกรดเข้มข้นมาเป็นสิ่งช่วยเร่งให้เกิดสภาวะการกัดกร่อน กับแท่งลูกปูนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและสูง 300 มิลลิเมตรจำนวนทั้งหมด 50 ลูก แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ 1) ใช้เหล็กกลมขนาด 3 มิลลิเมตรพันเกลียวเป็นเหล็กปลอก 2) ใช้เหล็กกลมขนาด 3 มิลลิเมตรตัดรูปสามเหลี่ยมเป็นเหล็กปลอก โดยทั้งสองประเภทใช้เหล็กเสริมหลักขนาด 10 มิลลิเมตรจำนวน 4 เส้นเท่ากันและมีระยะห่อหุ้มเหล็ก 10 มิลลิเมตรเท่ากันที่อายุกำลัง 28 วัน ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า FRP มีความแข็งแรงเพียงพอและสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี พิสูจน์ให้เห็นว่า FRP เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวิธีการซ่อมแซมด้วยการปะคอนกรีต Low Permeability ซึ่งการซ่อมแซมด้วยไฟเบอร์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าและจะยิ่งเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนชั้นที่พันด้วยแผ่นไฟเบอร์มากขึ้น

Mirmiran และคณะ [6, 8, 9] ได้เสนองานวิจัยว่า แผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังและความแข็งแรงให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแผ่นไฟเบอร์จะช่วยรัดคอนกรีต ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีคุณสมบัติการยืดหยุ่น (Ductility) เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเสาถูกรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะได้รับความเสียหายในลักษณะต่างๆ เช่น การรับน้ำหนักกระทำมากเกินไปจนแตกหัก โดยอาจมาจากการต่อเติมโครงสร้างที่ไม่ได้คำนึงถึงความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างเดิม การออกแบบที่ไม่ดีพลาดไม่เพียงพอ การก่อสร้างที่ผิดแบบ อุบัติเหตุเช่น รถชนตอหม้อสะพาน เป็นต้น สาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก หรือสูญเสียกำลังคือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต เมื่อเหล็กเกิดสนิม เหล็กจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตภายนอกที่ห่อหุ้มเหล็กหลุดร่อนออก ซึ่งจะทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลังอัด เนื่องจากคุณสมบัติการยึดแน่นของคอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้นการเกิดสนิมจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดึงลงอย่างมากและรวดเร็ว

Cabrera และ Ghoddoussi ศึกษาวิจัยผลกระทบจากการกัดกร่อนของคานขนาด 160x125x1000 มม. ที่มีเหล็กเสริมบนขนาด 10 มม. 2 เส้น และเหล็กเสริมล่างขนาด 12 มม. 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาด 8 มม. เหล็กเสริมรับแรงดึงถูกกัดกร่อนโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นไม่แน่ชัด การลดลงของพื้นที่หน้าตัดเหล็กสูงสุดเป็น 9% ซึ่งลดลงเป็น 20% ของโมเมนต์ดัดสูงสุด และเพิ่มขึ้น 40% ของการแอ่นตัวของคานเมื่อรับน้ำหนักใช้งาน

Li และคณะ [16] ได้ทำการซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดรอยแตกร้าวด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังชนิดต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเสาเกิดรอยร้าวและคอนกรีตที่ผิวเกิดการกะเทาะออก เสามีกำลังอัดลดลงถึง 75% เมื่อทำการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ กำลังอัดของเสามีค่าเพิ่มขึ้นอีก 20% เมื่อเทียบกับเสาที่ยังไม่เกิดรอยแตก และเสามีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึง 95% เมื่อเทียบกับเสาที่มีรอยแตก

อานนท์ วงษ์แก้ว [20] การศึกษาเสนอผลการทดสอบประกอบด้วย เสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง โดยเสากลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1500 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร เสารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดหน้าตัด 200x200 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตรและคานช่วงเดียวขนาดหน้าตัด 150x250 มิลลิเมตร ช่วงยาว 1200 มิลลิเมตร และตัวอย่างเสาถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังถูกติดหรือพันไว้ที่ผิวด้านนอกของเสา ส่วนคานถูกติดไว้ที่ผิวท้องคานผลการทดสอบแสดงว่า กำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 20-60 เปรียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง ส่วนกำลังรับแรงดัดของคานเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 20-40 เมื่อเสริมด้วยวัสดุแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง 1 ชั้น ความเหนียวของเสาและคานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง

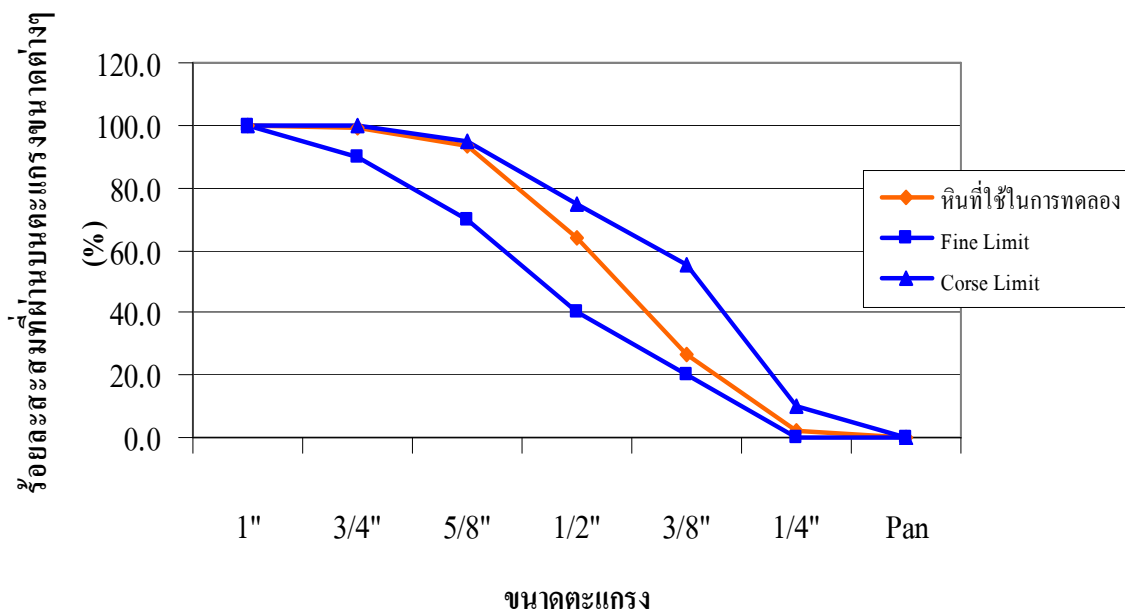
**บทที่ 3**  
**วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

**3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง**

- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
- 2) หิน (Coarse Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินปูน โดยมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.1 และจากรูปที่ 3.1 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าหินที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33

ตารางที่ 3.1 ขนาดคละของหิน

ขนาด ตะแกรง	ขนาด ตะแกรง	ปริมาณ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ ที่ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละ สะสมที่ค้ำ บนตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ	ร้อยละสะสมที่ ผ่านบนตะแกรง ขนาดต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
(ins)	(mm.)	(kg.)	(%)	(%)	(%)		
1"	25.000	0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.000	45.7	0.9	0.9	99.1	90	100
5/8"	15.875	280.1	5.6	6.5	93.5	N/A	N/A
1/2"	12.500	1483	29.7	36.2	63.8	N/A	N/A
3/8"	9.500	1870.2	37.4	73.6	26.4	20	55
1/4"	4.750	1196.9	23.9	97.5	2.5	0	10
Pan	-	123.7	2.5	100.0	0.0	-	-
รวม		4999.6	100.0	-	-	-	-



รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่างๆ ของหินเทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

3) ททราย (Fine Aggregate) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.2 และจากรูปที่ 3.2 เป็นกราฟแสดงร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ของทรายเทียบกับมาตรฐาน จะเห็นว่าทรายที่นำมาทดสอบมีขนาดคละอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM C33

4) น้ำ (Water) น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยที่น้ำจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของคอนกรีต ทำให้มีความชื้นเหลือในการเทคอนกรีตลงแบบหล่อได้ สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา ในห้องปฏิบัติการคอนกรีตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5) เหล็กกลมผิวเรียบ (Round bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็กตามมาตรฐาน มอก.20 กำหนดให้เหล็กกลมผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 2400 กก./ตร.ซม. โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 มม. แสดงดังรูปที่ 3.3

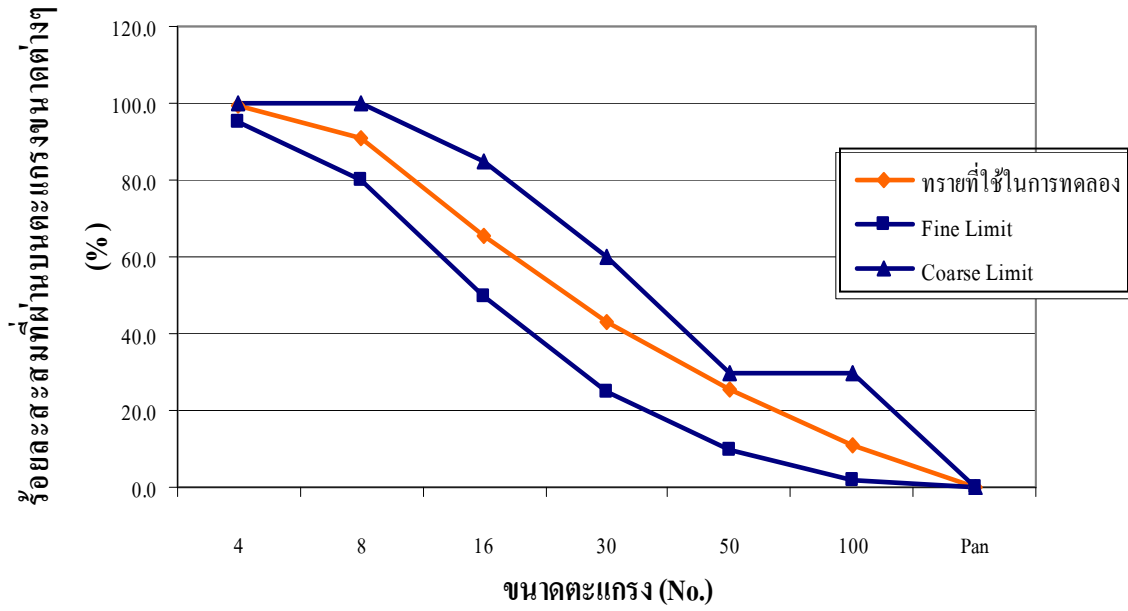
6) เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือป่องหรือครีบเกลียว ตามมาตรฐาน มอก.24 โดยชั้นคุณภาพของเหล็ก คือ SD30



หมายถึง มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 3000 กก./ตร.ซม. โดยขนาดหน้าตัดของเหล็กที่ใช้ คือ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. แสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย

ขนาด ตะแกรง  (No.)	ขนาด ตะแกรง  (mm.)	ปริมาณ ที่ค้างบน ตะแกรง  (kg.)	ร้อยละ ที่ค้างบน ตะแกรง  (%)	ร้อยละ สะสมที่ค้าง บนตะแกรง ขนาดต่างๆ  (%)	ร้อยละ สะสมที่ผ่าน ตะแกรง ขนาดต่างๆ  (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน บนตะแกรงขนาด ต่างๆ (ASTM) (%)	
						Fine Limit	Coarse Limit
4	0.6350	8.6	0.9	0.9	99.1	95	100
8	0.3175	79.3	7.9	8.8	91.2	80	100
16	0.1588	257.5	25.8	34.5	65.5	50	85
30	0.0847	222.3	22.2	56.8	43.2	25	60
50	0.0508	180.1	18.0	74.8	25.2	10	30
100	0.0254	143.5	14.4	89.1	10.9	2	30
Pan	-	108.4	10.8	100.0	0.0	-	-
รวม	-	999.7	100.0	-	-	-	-



รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของทราย เทียบกับขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33



รูปที่ 3.3 เหล็กเสริมที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบ

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทรงกระบอกผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรสูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง

- 2) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixing Machine) ใช้สำหรับผสมหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และ น้ำคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.5 เครื่องผสมคอนกรีต

3) ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำการเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า ภาพซ้ายเป็นเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และภาพขวาเป็นเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า ในการทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมมีการทดสอบหลายชุด จึงใช้เครื่องกระจายกระแสไฟฟ้าทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาสนิมได้จำนวนมาก



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์เร่งปฏิกิริยา

4) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เป็นไปตามทฤษฎี ต้องมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านเหล็กเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิม โดยการวัดจะวัดที่เวลาห่างกัน 2 ชั่วโมง ตลอดการทำการทดลอง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า

6) เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Testing Machine) ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงอัด

7) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital Balance) ใช้สำหรับหาปริมาณน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น หิน ทราย ปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

## บทที่ 4

### การเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กเสริมในตัวอย่างทรงกระบอก

บทนี้เป็นการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถูกต้องของสมการที่ 1 ในการคำนวณหาหน้าเหล็กที่สูญเสียไป นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของขนาดเหล็กเสริมและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน้าเหล็กที่สูญเสียไประหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม การทดลองใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ขนาดเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีขนาด RB9 DB12 DB16 DB20 และ DB25 และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมี 3 ค่าคือ 210 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเร่งปฏิกิริยาสนิมทำการศึกษาที่ระดับค่าการสูญเสียหน้าเหล็กของเหล็กที่ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของหน้าเหล็กเริ่มต้น การทดลองเริ่มจากการหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่าง พร้อมเสียบเหล็กขนาดต่างๆ แซ่ตัวอย่างและทำการผ่านกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาสนิม เก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าและเวลาเมื่อตัวอย่างได้ระดับความสูญเสียตามที่ต้องการ นำตัวอย่างขึ้นทำการกัดคอนกรีตให้แตกเพื่อนำเหล็กเสริมภายในมาล้างน้ำให้สะอาดและชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่ เปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นทำให้ทราบน้ำหนักที่สูญเสียไป ส่วนข้อมูลกระแสไฟฟ้าและเวลาที่บันทึกไว้ระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม ถูกนำมาคำนวณหาหน้าเหล็กที่สูญเสียไปตามสมการที่ 1 นำค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปจากการชั่งน้ำหนัก มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้ รายละเอียดของการทดลองและผลการทดลอง อธิบายไว้ในส่วนถัดไป

การทดลองนี้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. จำนวนทั้งหมด 144 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบการเร่งปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมขนาดต่างๆ โดยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ 210, 280, และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมี 9 ตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่านั้นจึงไม่มีการเสียบเหล็ก และอีก 135 ตัวอย่างสำหรับการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมที่มีเหล็กเสริมขนาดต่างๆ เสียบอยู่ ปริมาณคอนกรีตที่ใช้ต่อหนึ่งตัวอย่างคำนวณได้เท่ากับ 0.008 ลบ.ม. ดังนั้นปริมาณคอนกรีตทั้งหมดคิดต่อค่ากำลังอัดประลัยหนึ่งๆ ใช้คอนกรีตเท่ากับ 0.384 ลบ.ม. วันก่อนทำการผสมคอนกรีตนั้นมีฝนตกทำให้มวลรวมต่างๆ มีความชื้นเพิ่มขึ้น จึงต้องเพิ่มปริมาณมวลรวมขึ้นและลดปริมาณลง น้ำหนักของมวลรวมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 จำนวนตัวอย่างและขนาดเหล็กที่ใช้ทำการทดลองการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมเสริม

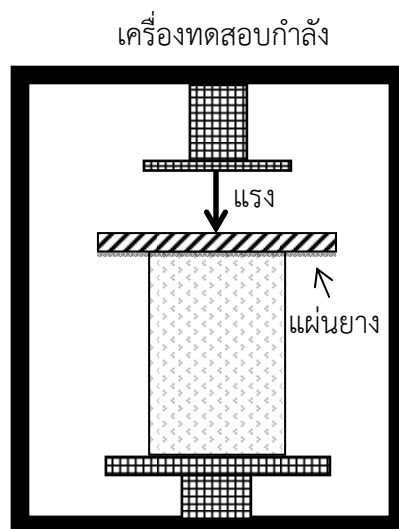
กำลังอัดประลัย (กก.ต่อตร. ซม.)	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียของเหล็ก			รวมจำนวนตัวอย่าง
		20	40	60	
210	-	-	-	-	3
	RB9	3	3	3	9
	DB12	3	3	3	9
	DB16	3	3	3	9
	DB20	3	3	3	9
	DB25	3	3	3	9
280	-	-	-	-	3
	RB9	3	3	3	9
	DB12	3	3	3	9
	DB16	3	3	3	9
	DB20	3	3	3	9
	DB25	3	3	3	9
350	-	-	-	-	3
	RB9	3	3	3	9
	DB12	3	3	3	9
	DB16	3	3	3	9
	DB20	3	3	3	9
	DB25	3	3	3	9
จำนวนตัวอย่าง					144

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตของตัวอย่างทรงกระบอก

กำลังอัดประลัย (กก.ต่อตร. ซม.)	ส่วนผสม (กก. ต่อ ลบ.ม.)				น้ำหนักรวม (กก.ต่อลบ.ม.)
	หิน	ทราย	ซีเมนต์	น้ำ	
210	1093	832	287	161	2373
280	1093	794	336	163	2386
350	1093	728	406	164	2391

#### 4.1 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก

นำตัวอย่างทรงกระบอกที่มีอายุครบ 28 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Testing Machine) โดยวางตัวอย่างทรงกระบอกในแนวตั้ง นำแผ่นยางวางที่ด้านบนเพื่อให้แรงกดจากเครื่องทดสอบกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตัวอย่างทรงกระบอก ดังรูปที่ 4.1 เริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักทีละน้อยจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ทำให้ได้ค่ากำลังอัดประลัยจากนั้นทำการทดสอบซ้ำเดิมอีก 2 ครั้ง นำค่าที่ได้มาเฉลี่ย นำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้ พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบมีความแตกต่างจากค่าที่ออกแบบไว้อยู่ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่มีค่าเป็นลบนั้นเนื่องจากค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 4.1 การทดสอบกำลังอัดตัวอย่าง

ตารางที่ 4.3 แสดงกำลังอัดประลัยที่ได้จากเครื่องทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ แรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 200.66 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แตกต่างจากที่ออกแบบ 4.45 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ แรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 268.41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แตกต่างจากที่ออกแบบ 4.14 เปอร์เซ็นต์ และค่ากำลังอัดประลัยของ



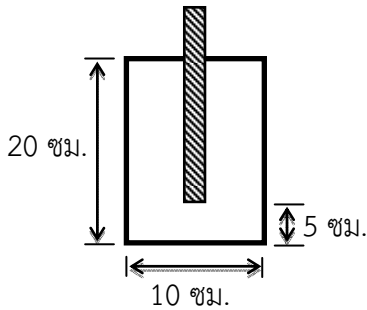
คอนกรีตเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ แรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 338.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แตกต่างจากที่ออกแบบ 3.21 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ค่าเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณและการกดกำลังอัดจากเครื่องทดสอบของตัวอย่าง คอนกรีตรูปทรงกระบอก

ค่ากำลังอัดประลัยที่ ออกแบบ (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)	ค่ากำลังอัดประลัยที่ได้ จากการทดสอบ (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความ แตกต่าง (%)
210	207.02	200.66	-4.45
	201.56		
	193.39		
280	284.63	268.41	-4.14
	261.27		
	259.32		
350	337.45	338.75	-3.21
	333.17		
	345.63		

#### 4.2 ตัวอย่างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเร่งปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตรูปทรงกระบอก

1) คอนกรีตทรงกระบอก สูง 20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เหล็กเสริมขนาด RB9 DB12 DB 16 DB20 DB25 ยาว 20 เซนติเมตร จำนวน 135 ลูก แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยเสียบเหล็กลงในตัวอย่าง 15 เซนติเมตร มีส่วนที่ยื่นมาด้านบนตัวอย่าง 5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 คอนกรีตทรงกระบอกที่เสียบเหล็กขนาด RB9 DB12 DB16 DB20 DB25

2) ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำการเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วย เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า และ เครื่องกระจายกระแสไฟฟ้า เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้านี้ใช้ 2 เครื่อง เนื่องจากขณะทำการเร่งปฏิกิริยา สนิม ได้ทำการเปิดเครื่องไว้ตลอดโดยไม่มีการปิดเครื่องตั้งนั้นทั้ง 2 เครื่องได้ถูกใช้หมุนเวียนปลัดกันเครื่อง ละ 1 เดือน อุปกรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

3) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า รุ่น UT200 Series เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดค่าต่างๆได้ ทั้งค่าความต้านทาน กระแสไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ เป็นต้น นำมาวัดค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อนำมา คำนวณหาค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไป โดยเก็บค่ากระแสไฟฟ้าเป็นกระแสตรง ค่ากระแสไฟฟ้าอ่านได้ที่ หน้าจอแสดงผลมีค่าแสดงผลเป็นตัวเลข วัดโดยการใช้ขั้ววัดคร่อมสายไฟที่ปล่อยกระแส หน่วยเป็น แอมแปร์ (A) ดังรูปที่ 3.7 โดยการวัดจะวัดที่เวลา 8.00 13.00 18.00 และ 21.00 น. ของทุกวัน

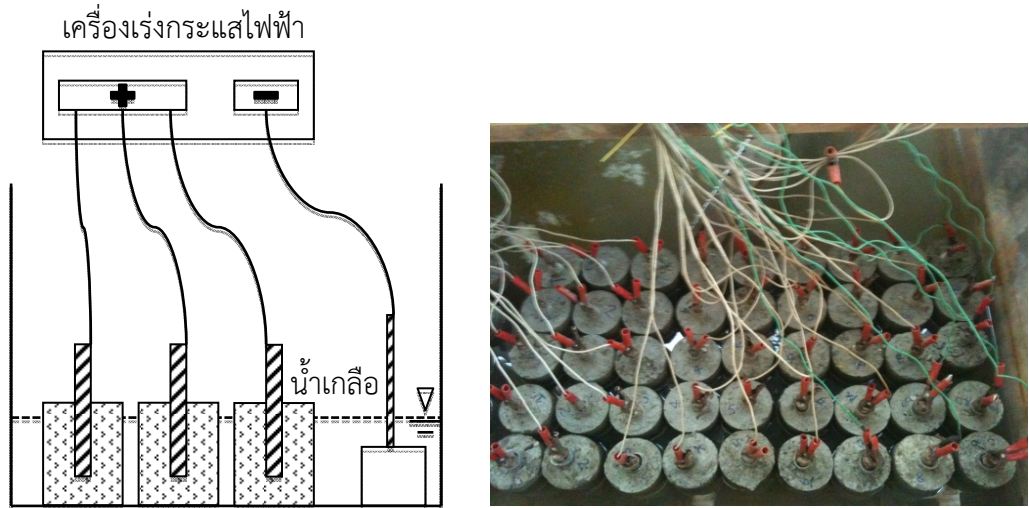
การบ่มคอนกรีตหรือบำรุงคอนกรีต เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำ ปฏิกิริยากับซีเมนต์ ระเหยออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เพื่อให้ คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามที่ต้องการ หลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จน ผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้ว จะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้อง โดยปกคลุมผิวมิให้ ถูกแดดหรือลมร้อน และมีให้ถูกรบวนหรือสะท้อนโดยเฉพาะภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามต้องการ อีกทั้งเป็นการป้องกันการสูญเสียน้ำจาก คอนกรีตที่เทใหม่ ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็วทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวที่กำลังจะแห้ง เป็นผลทำ ให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วงเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากเทคอนกรีตลงแบบ หล่อแล้ว เรียกว่าระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต โดยกำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็ว ในระยะแรกและ ค่อย ๆ ซ้ำลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ โดย อุณหภูมิที่ชุ่มมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ควรอยู่ระหว่าง 15-39 องศา เซลเซียส สำหรับในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน นับจากวันที่หล่อ คอนกรีตเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นให้กับคอนกรีตด้วยการหล่อน้ำ

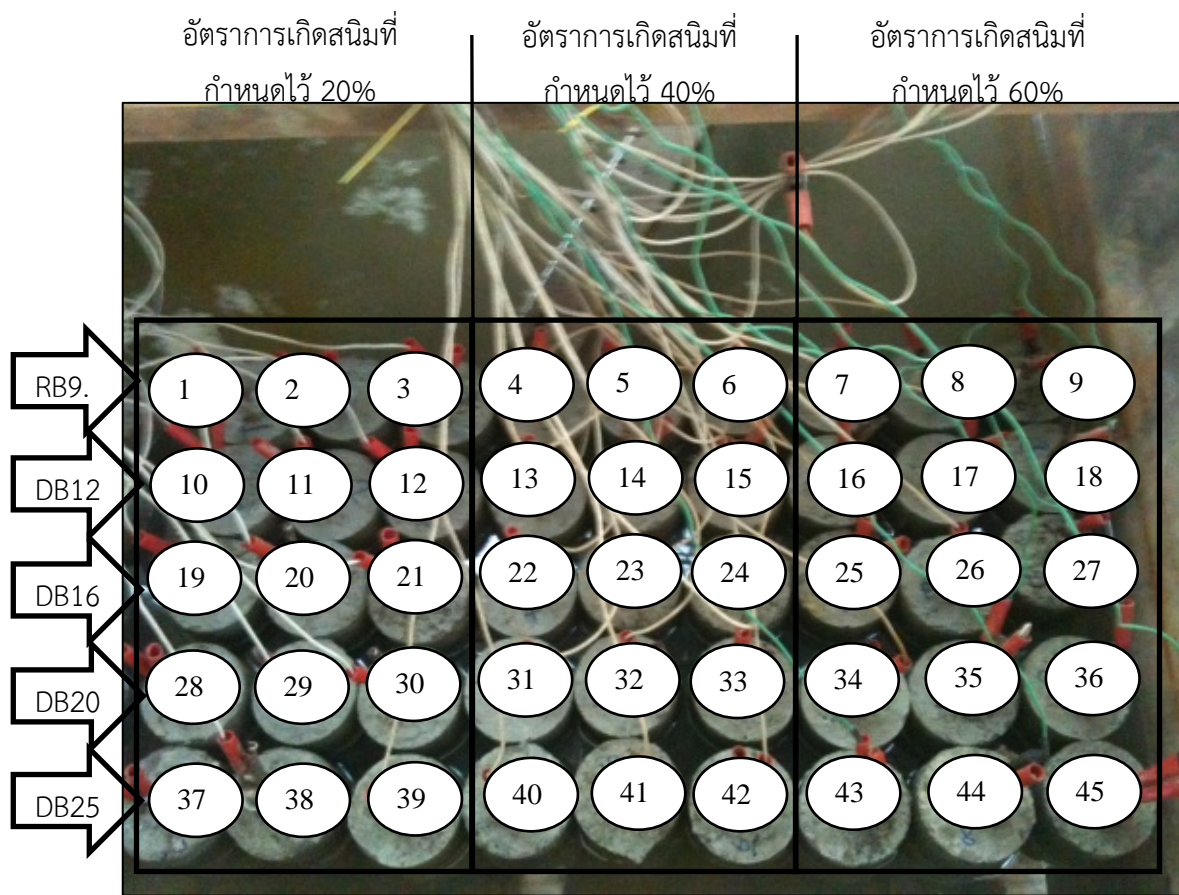
#### 4.3 ขั้นตอนการทดลองเร่งปฏิกิริยาคอนกรีตทรงกระบอก

การทดลองการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคอนกรีตทรงกระบอก เริ่มทำงานการทดลองโดยการนำ คอนกรีตทรงกระบอกที่เสียบเหล็กเสริมแช่ลงในบ่อน้ำที่มีเกลือ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำในบ่อ โดย ก่อนที่มีการเริ่มทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมต้องมีการเตรียมน้ำผสมเกลือลงในบ่อให้พร้อม ให้ระดับน้ำต่ำกว่า ผิวบนของตัวอย่างประมาณ 5 เซนติเมตร เมื่อเตรียมน้ำที่มีน้ำเกลือพร้อมสามารถเริ่มการเร่งปฏิกิริยา สนิมได้ทันที โดยทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมจน ตามขั้นตอนดังนี้  
ได้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กตามที่กำหนดไว้

1) เริ่มต้นให้นำคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาลงในบ่อที่มีน้ำการผสมเกลือ ทำการต่อสายไฟที่ ออกมาจากเครื่องกระจายกระแสไฟฟ้าเข้ากับเหล็ก ดังรูปที่ 4.3 การเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กต้องทำการ กำหนดให้เหล็กในแต่ละขนาดมีการสูญเสีย 3 ระดับคือ 20 , 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยผิวด้านบนของ ตัวอย่างที่มีเหล็กเสียบอยู่เหนือระดับน้ำประมาณ 5 เซนติเมตร ในแต่ละกำลังอัดประลัยทำการเรียง ตัวอย่างให้เป็นแนวและเรียงตามขนาดเหล็กจากบนลงล่างเป็น 5 แถวดังนี้ 9 , 12 , 16 , 20 , 25 มิลลิเมตร และเรียงจากซ้ายไปขวาเป็นหมายเลขตัวอย่างโดยมีแถวละ 9 ลูก เรียงดังนี้ แถวแรกเป็นเหล็ก ขนาด 9 มิลลิเมตร กำหนดตัวอย่างเป็นหมายเลข 1-9 แถวที่สองเป็นเหล็กขนาด 12 มิลลิเมตร กำหนด ตัวอย่างเป็นหมายเลข 10-18 แถวที่สามเป็นเหล็กขนาด 16 มิลลิเมตร กำหนดตัวอย่างเป็นหมายเลข 19-27 แถวที่สี่เป็นเหล็กขนาด 20 มิลลิเมตร กำหนดตัวอย่างเป็นหมายเลข 28-36 และแถวสุดท้ายเป็น เหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร กำหนดตัวอย่างเป็นหมายเลข 37-45 โดยทำการกำหนดให้ลูกที่ 1-3 ในแต่ละ แถวเป็นการสูญเสีย 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ลูกที่ 4-6 ในแต่ละแถวสูญเสีย 40 เปอร์เซ็นต์ และให้ลูกที่ 7-9 ใน แต่ละแถวเป็นการสูญเสีย 60 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 การจัดเรียงในลักษณะนี้ เป็นการช่วยใน การเก็บข้อมูลเพื่อป้องกันการสับสนในการนำขึ้นและการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการแรงกระแสไฟฟ้าคอนกรีตรูปทรงระบอก



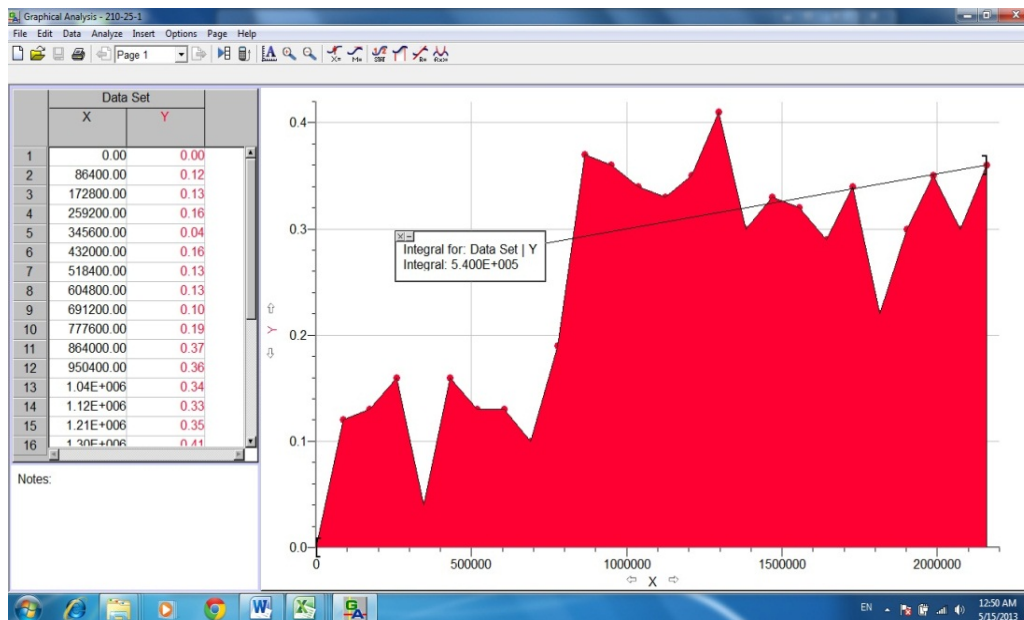
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการจัดเรียงตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้า

2) ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและบันทึกค่าทุกวันๆละ 4 ครั้ง มีช่วงเวลาดังต่อไปนี้ 8.00, 13.00, 18.00 และ 21.00 น. เพื่อนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปตามสมการที่ 1 และเมื่อตัวอย่างได้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กตามที่กำหนดไว้ให้นำตัวอย่างขึ้นจากบ่อแร่ปฏิบัติการสนิมเพื่อไปใช้ทดสอบในขั้นตอนถัดไป วิธีการคำนวณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปจากข้อมูลกระแสไฟฟ้าหน่วยเป็นแอมแปร์และช่วงเวลาที่จดบันทึกหน่วยเป็นวินาที สามารถทำได้ดังนี้

2.1) ในช่วงระยะเวลาครบรอบ 1 วัน นำค่ากระแสไฟฟ้ามาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละวันแล้วนำมาสร้างกราฟโดยให้แกน Y เป็นค่ากระแสที่เก็บได้ในแต่ละวันหน่วยเป็นแอมแปร์ และแกน X เป็นระยะเวลาที่ทำการเร่งปฏิบัติการสนิมหน่วยเป็นวินาที ด้วยโปรแกรม Graphical Analysis แสดงดังรูปที่ 4.5

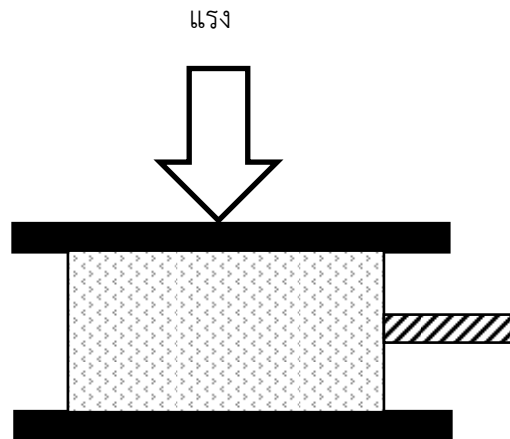
2.2) ใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเป็นเอาค่า  $I$  คูณอยู่กับค่า  $t$

2.3) นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการฟาราเดย์  $\Delta W = \frac{ItA_m}{ZF}$  โดยค่า  $A_m$ ,  $Z$ , และ  $F$  เป็นค่าคงที่แสดงไว้ในบทที่ 2 ค่าที่ได้จากสมการเป็นค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปเนื่องจากการเร่งปฏิบัติการสนิม



รูปที่ 4.5 ภาพตัวอย่างการนำค่าไปใช้ในโปรแกรม Graphical Analysis

3) จากนั้นนำแท่งคอนกรีตที่เอาขึ้นจากบ่อเร่งปฏิกิริยาสนิมมาทำการกดให้แตก ด้วยเครื่องทดสอบ โดยกดน้ำหนักลงด้านข้างของคอนกรีตทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 4.6 ให้คอนกรีตแตกออกเพื่อนำเหล็กเสริมที่เกิดสนิมออกมา การกดนี้ต้องการให้คอนกรีตแตกออกเพื่อนำเหล็กออกมาเท่านั้นไม่ได้เป็นการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแต่อย่างใด



รูปที่ 4.6 การกดด้านข้างของตัวอย่างเพื่อนำเอาเหล็กออก

การนำเหล็กที่เสียบอยู่ในตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกออกมาด้วยวิธีนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เหล็กเสียหายจากการทุบหรือสกัดออก เหล็กที่นำออกมานั้นยังมีเศษปูนและสนิมเกาะอยู่ ดังรูปที่ 4.7 ก่อนการชั่งน้ำหนักเหล็กต้องนำเหล็กไปทำความสะอาดเพื่อให้เศษคอนกรีตและสนิมที่ติดอยู่กับเหล็กหลุดออก เพื่อไม่ให้เวลานำไปชั่งน้ำหนักมีน้ำหนักของคราบสนิมและเศษปูนที่เกาะอยู่รวมอยู่ด้วย



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างเหล็กที่ออกมาจากคอนกรีตทรงกระบอก

4) ทำความสะอาดเหล็ก กัดสนิมที่เกาะบนเหล็กออกให้หมด เพื่อให้ได้น้ำหนักจริงของเหล็กที่เหลืออยู่ รูปที่ 4.8 แสดงเหล็กที่ได้ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วไม่มีคราบสนิมเกาะอยู่ เพื่อนำไปชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม



รูปที่ 4.8 เหล็กที่ผ่านการทำความสะอาดและกัดสนิม

5) นำเหล็กไปชั่งน้ำหนัก เพื่อให้ทราบถึงน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่จากการเร่งปฏิกิริยาสนิม นำน้ำหนักที่ชั่งได้ไปลบออกจากน้ำหนักเหล็กเริ่มต้น ค่าที่ได้เป็นค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปจากการเร่งปฏิกิริยาสนิม

6) นำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการพาราเดย์กับค่าที่คำนวณได้จากการชั่งน้ำหนักจริง เพื่อหาความแตกต่างของค่าทั้งสอง

## บทที่ 5

### ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคอนกรีตรูปทรงกระบอก

#### 5.1 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กในคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาคำนวณด้วยโปรแกรม Graphical Analysis ของเหล็กขนาด RB9 DB12 DB1 DB20 และ DB25 สำหรับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดลองพบว่าค่าพื้นที่ใต้กราฟของเหล็กแต่ละเส้นที่เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเหล็กเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนตารางที่ 5.2 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาคำนวณด้วยโปรแกรม Graphical Analysis ของเหล็กขนาด RB9 DB12 DB1 DB20 และ DB25 สำหรับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และตารางที่ 5.3 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าของเหล็กขนาด RB9 DB12 DB1 DB20 และ DB25 สำหรับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อพิจารณาจากค่าพื้นที่ใต้กราฟในตารางทั้งสองพบว่าแนวโน้มของค่ามีลักษณะเดียวกันกับตารางที่ 5.1 คือค่าพื้นที่ใต้กราฟของเหล็กแต่ละเส้นที่เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเหล็กเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเหล็กเส้นที่ขนาดเท่ากันพบว่าถึงแม้ว่าค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ใต้กราฟมากนัก แสดงว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากกว่าไม่มีผลทำให้การเกิดสนิมน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการเร่งปฏิกิริยาสนิมนี่ไม่ใช่วิธีตามธรรมชาติ แต่เป็นวิธีการกระตุ้นปฏิกิริยาสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งจ่ายจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังแท่งเหล็กโดยตรง จึงทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมิได้ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสนิม อย่างไรก็ตามจากการสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงระยะเวลาต้นๆ ของการทดลอง เหล็กเส้นที่มีขนาดเดียวกันจากแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าจะวัดค่ากระแสได้น้อยกว่าเหล็กเส้นที่เปรียบเทียบกับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดน้อยกว่า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไประยะหนึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในเหล็กของแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเหล็กเส้นที่เปรียบเทียบกับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดน้อยกว่า ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายได้ว่าแท่งคอนกรีตที่มีกำลังสูงซึ่งมีค่าความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตสูงขึ้นด้วยนั้น อาจช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมที่เสียบอยู่ในแท่งคอนกรีตนั้นๆ ในช่วงต้นๆ ของขบวนการเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามเมื่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว ค่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่มีผลทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาน้อยลงแต่อย่างไร จึงทำให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาของแท่งเหล็กขนาดเท่ากันที่เสียบอยู่กับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันจากเหล็กเสริมขนาดเดียวกันที่เสียบอยู่กับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดน้อยกว่า



เมื่อได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาของแท่งเหล็กขนาดต่างๆ นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียตามสมการที่ 1 ค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.4-5.6 โดยแบ่งตามค่ากำลังอัดคอนกรีตและขนาดของเหล็ก นอกจากค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียที่ได้จากการคำนวณตามสมการแล้ว ค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปซึ่งคำนวณได้จากการชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่หลังการเร่งกระแสไฟฟ้า และผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไประหว่างวิธีการทั้งสองได้ถูกแสดงไว้ในตารางดังกล่าวด้วย ตารางที่ 5.4 แสดงน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์สำหรับกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตารางที่ 5.4 และ 5.5 แสดงน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์สำหรับกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ การทดสอบหาค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปซึ่งคำนวณได้จากการชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่นั้นดำเนินการได้ยาก เนื่องจากเศษคอนกรีตที่ติดอยู่ที่ผิวของแท่งเหล็กติดแน่นและขัดออกค่อนข้างยาก ถึงแม้จะดำเนินการขัดออกด้วยความระมัดระวัง จึงทำให้ค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากการชั่งมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก ทำให้ไม่สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไประหว่างการชั่งน้ำหนักและการคำนวณด้วยสมการได้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักส่วนใหญ่พบว่ามีย่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักเหล็กที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 เมื่อพิจารณาจากเหล็กที่กระเทาะออกมา พบว่าที่ผิวเหล็กมีคอนกรีตเกาะอยู่และถึงแม้ว่าทำการขัดแล้วก็ไม่สามารถกระเทาะคอนกรีตออกจากผิวเหล็กโดยไม่ทำให้เนื้อเหล็กสูญเสียได้ จึงทำให้ค่าน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่จากการชั่งมีค่ามากกว่าค่าที่ควรจะเป็นและส่งผลให้ค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปมีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น จึงสรุปได้ว่าขั้นตอนในการขัดคอนกรีตออกจากผิวเหล็กนั้นมีความสำคัญมาก มีผลกระทบโดยตรงกับน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาสนิมด้วยไฟฟ้า ดังนั้นการขัดคอนกรีตต้องทำด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เหล็กเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดคอนกรีต หรือขอเสนอแนะให้ใช้วิธีการล้างคอนกรีตที่ติดอยู่กับผิวเหล็กและสนิมเหล็กด้วยสารเคมีเช่นกรดอ่อน ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาต่อไป

รูปที่ 5.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ โดยคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างเหล็กขนาด RB9 DB12 DB16 DB20 และ DB25 ส่วนรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงกราฟประเภทเดียวกันสำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากรูปกราฟทั้งสามเมื่อขนาดเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าค่าผลต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปได้ดีพอสมควรสำหรับเหล็กขนาดเล็กกว่า DB12 อย่างไรก็ตามไม่สามารถสรุปได้ว่าสมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่

สูญเสียไปเมื่อเหล็กมีขนาดใหญ่กว่า DB12 ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลจากการทดสอบมีความคาดเคลื่อน ควรมีการทำการทดสอบเพิ่มเติม

รูปที่ 5.4-5.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการเมื่อเหล็กมีขนาดเท่ากับ RB9 DB12 DB14 DB20 และ DB25 ตามลำดับเมื่อค่ากำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 210 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการของเหล็กขนาด RB9 DB12 และ DB16 มีค่าน้อยลง แต่สำหรับเหล็กขนาดใหญ่ขึ้น DB20 และ DB25 เมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ )

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (lt)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟ (lt)
210	1	RB9	20	67820	63357
	2			60910	
	3			61340	
	4		40	147300	133500
	5			134400	
	6			118800	
	7		60	206900	193833
	8			179300	
	9			195300	
	10	DB12	20	106700	116633
	11			136100	
	12			107100	
	13		40	220300	229167
	14			236700	
	15			230500	
	16		60	360700	344133
	17			339100	
	18			332600	
	19	DB16	20	204300	208067
	20			180100	
	21			239800	
	22		40	397900	397467
	23			395300	
	24			399200	
	25		60	581000	626267
	26			671800	
	27			626000	

ตารางที่ 5.1 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (It)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (It)
210	28	DB20	20	310600	323867
	29			370700	
	30			290300	
	31		40	626800	657700
	32			696100	
	33			650200	
	34		60	934800	978700
	35			995300	
	36			1006000	
	37	DB25	20	639400	610567
	38			652300	
	39			540000	
	40		40	1348000	1264333
	41			1231000	
	42			1214000	
	43		60	1875000	1713667
	44			1534000	
	45			1732000	

ตารางที่ 5.2 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ )

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (lt)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (lt)
280	1	RB9	20	63940	61057
	2			65230	
	3			54000	
	4		40	138400	127633
	5			123100	
	6			121400	
	7		60	187500	171400
	8			153500	
	9			173200	
	10	DB12	20	166800	126300
	11			100200	
	12			111900	
	13		40	234600	223767
	14			212100	
	15			224600	
	16		60	360300	346633
	17			359900	
	18			319700	
	19	DB16	20	212100	209333
	20			219900	
	21			196000	
	22		40	382300	429400
	23			456200	
	24			449700	
	25		60	657500	615100
	26			544100	
	27			643700	

ตารางที่ 5.2 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (lt)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (lt)
280	28	DB20	20	289400	334500
	29			370700	
	30			343400	
	31		40	693400	667300
	32			657900	
	33			650600	
	34		60	985000	962600
	35			884800	
	36			1018000	
	37	DB25	20	454500	499833
	38			505000	
	39			540000	
	40		40	1113000	1105333
	41			1079000	
	42			1124000	
	43		60	1595000	1505333
	44			1485000	
	45			1436000	

ตารางที่ 5.3 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ )

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (It)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (It)
350	1	RB9	20	60050	60760
	2			63070	
	3			59160	
	4		40	123100	150933
	5			120200	
	6			209500	
	7		60	190500	205633
	8			227700	
	9			198700	
	10	DB12	20	121400	141000
	11			159000	
	12			142600	
	13		40	162400	195567
	14			226400	
	15			197900	
	16		60	303300	318833
	17			329200	
	18			324000	
	19	DB16	20	220500	213633
	20			221200	
	21			199200	
	22		40	434600	470567
	23			473000	
	24			504100	
	25		60	662700	680700
	26			704600	
	27			674800	

ตารางที่ 5.3 พื้นที่ใต้กราฟคำนวณจากโปรแกรม Graphical Analysis ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัดประลัย (ksc)	หมายเลขเหล็ก	ขนาดเหล็ก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พื้นที่ใต้กราฟ (It)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ ใต้กราฟ (It)
350	28	DB20	20	296800	365600
	29			321800	
	30			478200	
	31		40	713200	671333
	32			658400	
	33			642400	
	34		60	1031000	1011333
	35			966000	
	36			1037000	
	37	DB25	20	540000	567933
	38			552500	
	39			611300	
	40		40	953900	1023633
	41			1045000	
	42			1072000	
	43		60	1496000	1492000
	44			1465000	
	45			1515000	



ตารางที่ 5.4 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราโบล (  $f'_c = 210 \text{ ksc.}$  )

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก เริ่มต้น (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสีย จากการชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก ชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย จากการสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็ก ที่สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่งกับ สมการ (%)
210	1	RB9	88	73.59	14.41	16.38	19.63	22.31	-36.23
	2		86	68.95	17.05	19.83	17.63	20.50	-3.40
	3		84	62.55	21.45	25.54	17.75	21.13	17.25
	4		94	68.33	25.67	27.31	42.63	45.35	-66.07
	5		84	53.01	30.99	36.89	38.89	46.30	-25.49
	6		86	50.14	35.86	41.70	34.38	39.98	4.13
	7		94	-	-	-	59.87	63.69	-
	8		78	35.91	42.09	53.96	51.89	66.53	-23.28
	9		88	48.03	39.97	45.42	56.52	64.23	-41.41
	10	DB12	158	140.35	17.65	11.17	30.88	19.54	-74.96
	11		166	140.04	25.96	15.64	39.38	23.72	-51.69
	12		164	-	-	-	30.99	18.90	-
	13		154	120.6	33.4	21.69	63.75	41.40	-90.87
	14		156	116.23	39.77	25.49	68.5	43.91	-72.24
	15		166	107.27	58.73	35.38	66.7	40.18	-13.57
	16		154	90.6	63.4	41.17	104.38	67.78	-64.64
	17		152	-	-	-	98.13	64.56	-
	18		156	-	-	-	96.25	61.70	-

ตารางที่ 5.4 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเบิ้ล ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนักเหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่งหลัง การทดลอง (g)	น้ำหนักที่สูญเสีย จากการชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็ก ที่สูญเสียจากการชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสียไป จากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของน้ำหนัก เหล็กที่ได้จากการชั่งกับสมการ (%)
210	19	DB16	286	252.21	33.79	11.81	59.12	20.67	-74.96
	20		282	205.95	76.05	26.97	52.12	18.48	31.47
	21		302	-	-	-	69.39	22.98	-
	22		284	-	-	-	115.14	40.54	-
	23		284	249.07	34.93	12.30	114.39	40.28	-227.48
	24		288	245.7	42.3	14.69	115.52	40.11	-173.10
	25		280	233.32	46.68	16.67	168.13	60.05	-260.18
	26		292	-	-	-	194.4	66.58	-
	27		302	249	53	17.55	181.15	59.98	-241.79
	28	DB20	448	328.77	119.23	26.61	89.88	20.06	24.62
	29		472	370.11	101.89	21.59	107.27	22.73	-5.28
	30		444	-	-	-	84.01	18.92	-
	31		452	-	-	-	181.38	40.13	-
	32		470	465.66	-	-	201.44	42.86	-
	33		442	357.17	84.83	19.19	188.15	42.57	-121.80
	34		450	-	-	-	270.51	60.11	-
35	456		-	-	-	288.02	63.16	-	
36	454		-	-	-	291.11	64.12	-	

ตารางที่ 5.4 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 210 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสียจาก การชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก ชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย ไปจากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก สมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่ง กับสมการ (%)
210	37	DB25	674	-	-	-	185.03	27.45	-
	38		670	-	-	-	188.76	28.17	-
	39		710	-	-	-	156.26	22.01	-
	40		730	-	-	-	390.08	53.44	-
	41		710	-	-	-	356.22	50.17	-
	42		694	-	-	-	351.31	50.62	-
	43		702	-	-	-	542.58	77.29	-
	44		660	-	-	-	443.91	67.26	-
	45		674	188	486	72.11	501.2	74.36	-3.13

ตารางที่ 5.5 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราโบล (  $f'_c = 280 \text{ ksc.}$  )

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสียจาก การชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก ชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย ไปจากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็ก ที่สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่งกับ สมการ (%)
280	1	RB9	82	-	-	-	22.56	27.51	-
	2		80	-	-	-	23.6	29.50	-
	3		82	-	-	-	19.06	23.24	-
	4		92	-	-	-	43.53	47.32	-
	5		84	-	-	-	42.41	50.49	-
	6		84	-	-	-	41.82	49.79	-
	7		84	-	-	-	64.59	76.89	-
	8		80	-	-	-	55.52	69.40	-
	9		86	-	-	-	58.28	67.77	-
	10	DB12	152	-	-	-	31.76	20.89	-
	11		154	142.18	11.82	7.68	18.83	12.23	-59.31
	12		158	140	18	11.39	20.49	12.97	-13.83
	13		158	-	-	-	42.97	27.20	-
	14		156	-	-	-	39.34	25.22	-
	15		156	140.78	15.22	9.76	41.66	26.71	-173.72
	16		154	-	-	-	67.7	43.96	-
	17		160	-	-	-	65.09	40.68	-
	18		156	124	32	20.51	59.3	38.01	-85.31

ตารางที่ 5.5 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเบิ้ล ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่งหลัง การทดลอง (g)	น้ำหนักที่สูญเสีย จากการชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็ก ที่สูญเสียจากการชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสียไป จากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของน้ำหนัก เหล็กที่ได้จากการชั่งกับสมการ (%)
280	19	DB16	296	252.21	43.79	14.79	61.38	20.74	-40.17
	20		292	205.95	86.05	29.47	63.63	21.79	26.05
	21		302	-	-	-	56.72	18.78	-
	22		294	-	-	-	110.63	37.63	-
	23		294	-	-	-	132.01	44.90	-
	24		294	245.7	48.3	16.43	130.13	44.26	-169.42
	25		300	233.32	66.68	22.23	190.27	63.42	-185.35
	26		280	-	-	-	157.45	56.23	-
	27		283	-	-	-	186.27	65.82	-
	28	DB20	444	395	49	11.04	83.75	18.86	-70.92
	29		438	-	-	-	107.27	24.49	-
	30		424	-	-	-	99.37	23.44	-
	31		448	368	80	17.86	200.65	44.79	-150.81
	32		438	352	86	19.63	190.38	43.47	-121.37
	33		438	370	68	15.53	188.27	42.98	-176.87
	34		436	-	-	-	285.04	65.38	-
	35		436	-	-	-	256.04	58.72	-
	36		444	400	44	9.91	294.59	66.35	-

ตารางที่ 5.5 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 280 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสียจาก การชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก ชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย ไปจากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก สมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่ง กับสมการ (%)
280	37	DB25	716	-	-	-	131.52	18.37	-
	38		714	-	-	-	146.14	20.47	-
	39		684	610	74	10.82	156.26	22.85	-111.16
	40		700	386	314	44.86	322.08	46.01	-2.57
	41		722	508	214	29.64	312.24	43.25	-45.91
	42		692	-	-	-	325.26	47.00	-
	43		734	506	228	31.06	461.56	62.88	-102.44
	44		700	452	248	35.43	429.73	61.39	-73.28
	45		712	-	-	27.53	415.55	58.36	-

ตารางที่ 5.6 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราโบล่า ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ )

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่สูญเสีย จากการชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจากชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย ไปจากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่งกับ สมการ (%)
350	1	RB9	84	-	-	-	17.38	20.69	-
	2		86	-	-	-	18.25	21.22	-
	3		82	-	-	-	17.12	20.88	-
	4		88	-	-	-	35.62	40.48	-
	5		78	-	-	-	34.78	44.59	-
	6		76	-	-	-	60.62	79.77	-
	7		90	-	-	-	55.13	61.25	-
	8		94	-	-	-	65.89	70.1	-
	9		92	-	-	-	57.5	62.5	-
	10	DB12	158	-	-	-	35.13	22.23	-
	11		156	-	-	-	46.01	29.49	-
	12		154	-	-	-	41.27	26.8	-
	13		158	-	-	-	47	29.74	-
	14		152	-	-	-	65.52	43.1	-
	15		148	-	-	-	57.27	38.69	-
	16		152	-	-	-	87.77	57.74	-
	17		160	-	-	-	95.26	59.54	-
	18		156	-	-	-	93.76	60.10	-

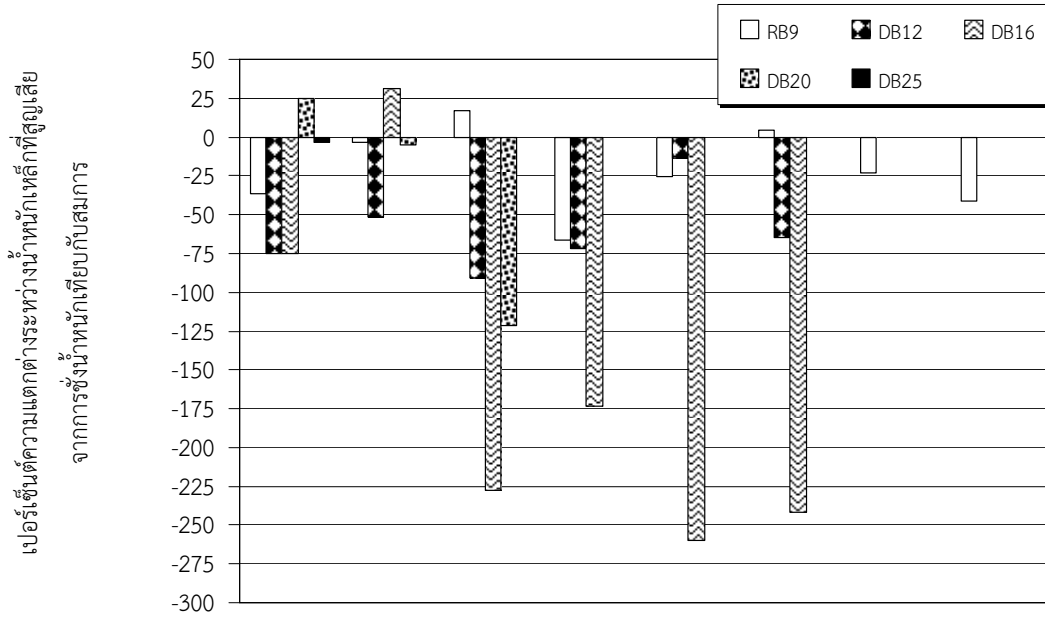
ตารางที่ 5.6 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราโบล (  $f'_c = 350 \text{ ksc.}$  ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสียจาก การชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก เหล็กที่สูญเสียจาก ชั่ง (%)	น้ำหนักที่ สูญเสียไปจาก สมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ น้ำหนักเหล็กที่ได้จากการชั่งกับ สมการ (%)
350	19	DB16	282	242	40	14.18	63.81	22.63	-59.53
	20		284	240	44	15.49	64.01	22.54	-45.48
	21		294	248	46	15.65	57.64	19.61	-25.30
	22		296	-	-	-	125.76	42.49	-
	23		306	196	110	35.95	136.88	44.73	-24.44
	24		310	174	136	43.87	145.88	47.06	-7.26
	25		286	-	-	-	191.77	67.05	-
	26		302	-	-	-	203.9	67.52	-
	27		316	202	114	36.08	195.27	61.79	-71.29
	28	DB20	452	402	50	11.06	85.89	19.00	-71.78
	29		462	399	63	13.64	93.12	20.16	-47.81
	30		452	398	54	11.95	138.38	30.62	-156.26
	31		436	-	-	-	206.38	47.33	-
	32		426	-	-	-	190.53	44.73	-
	33		432	-	-	-	185.9	43.03	-
	34		448	-	-	-	298.35	66.60	-
	35		438	-	-	-	279.54	63.82	-
	36		460	324	136	29.57	300.09	65.24	-120.65



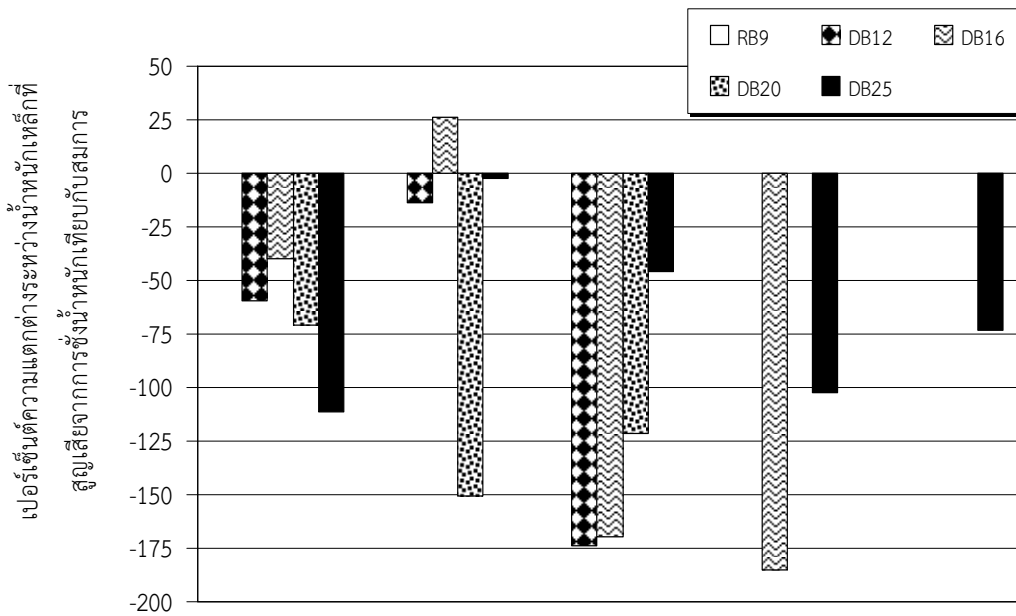
ตารางที่ 5.6 น้ำหนักเหล็กที่สูญเสียคำนวณจากการชั่งน้ำหนักและจากสมการพาราเดย์ ( $f'_c = 350 \text{ ksc.}$ ) (ต่อ)

กำลังอัด ประลัย (ksc)	หมายเลข เหล็ก	ขนาด เหล็ก	น้ำหนัก เหล็ก (g)	น้ำหนักเหล็กที่ชั่ง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักที่ สูญเสียจาก การชั่ง (g)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากชั่ง (%)	น้ำหนักที่สูญเสียไป จากสมการ (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเหล็กที่ สูญเสียจากสมการ (%)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ของน้ำหนักเหล็กที่ได้จาก การชั่งกับสมการ (%)
350	37	DB25	680	624	56	8.24	156.26	22.98	-179.04
	38		716	634	82	11.45	159.88	22.33	-94.98
	39		686	-	-	-	176.9	25.79	-
	40		688	-	-	-	276.04	40.12	-
	41		704	-	-	-	302.4	42.95	-
	42		710	598	112	15.77	310.21	43.69	-176.97
	43		666	-	-	-	432.91	65.00	-
	44		696	-	-	-	423.94	60.91	-
	45		674	188	486	72.11	438.41	65.05	9.79



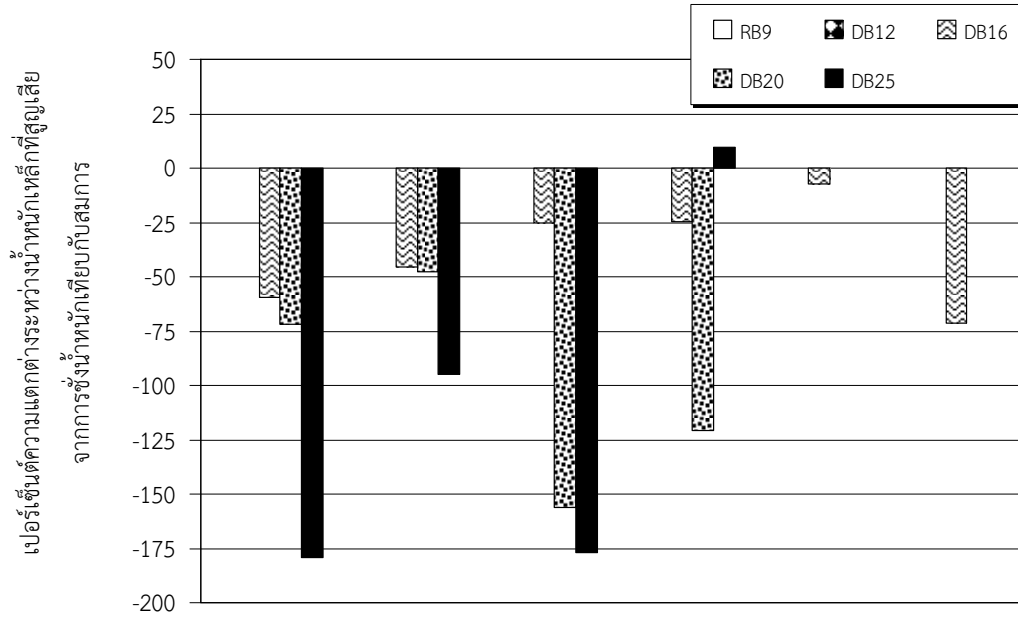
กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รูปที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักรเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



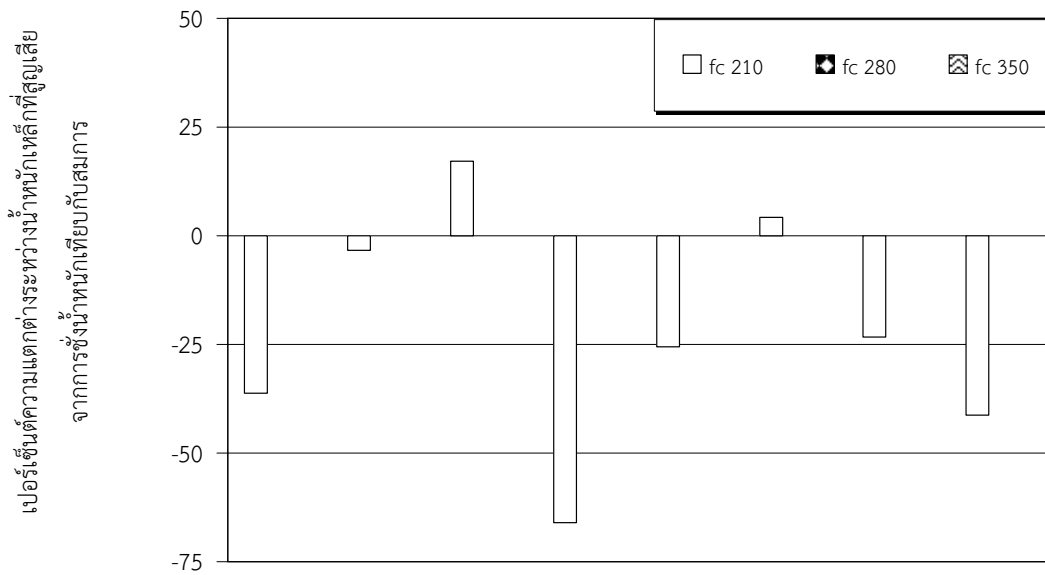
กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รูปที่ 5.2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักรเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



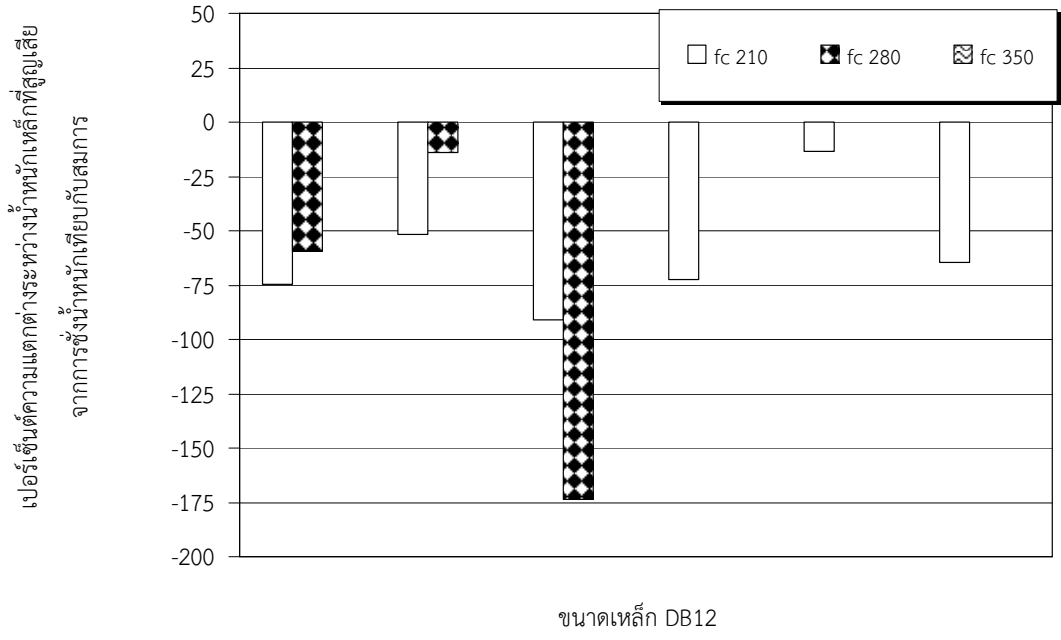
กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รูปที่ 5.3 เปอรเซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

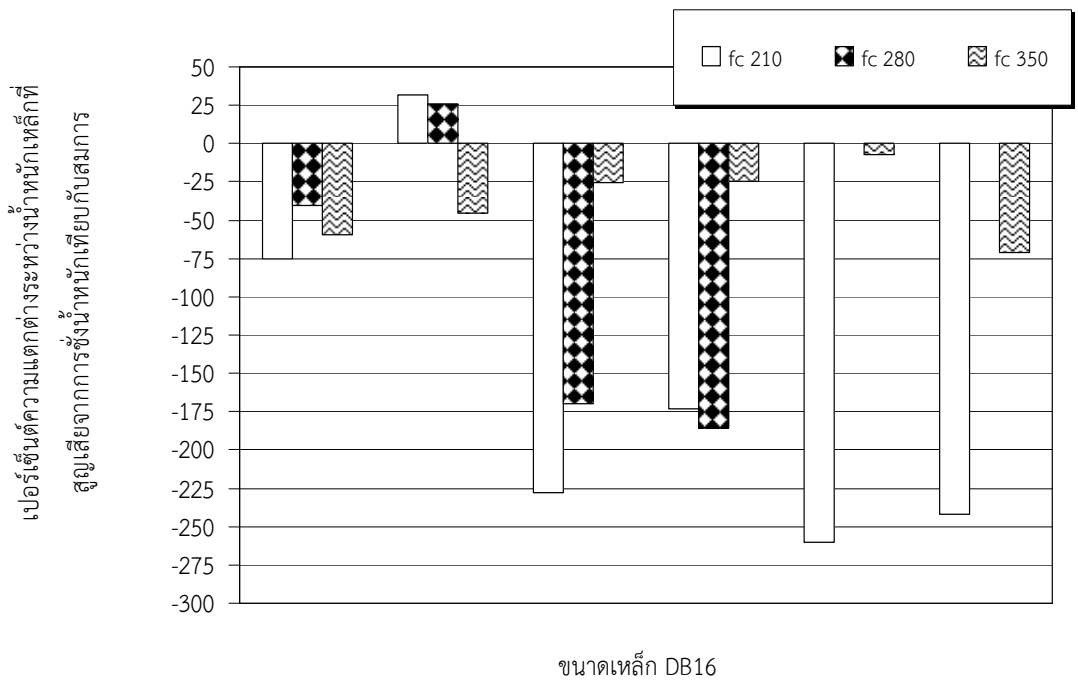


ขนาดเหล็ก RB9

รูปที่ 5.4 เปอรเซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับเหล็ก RB9

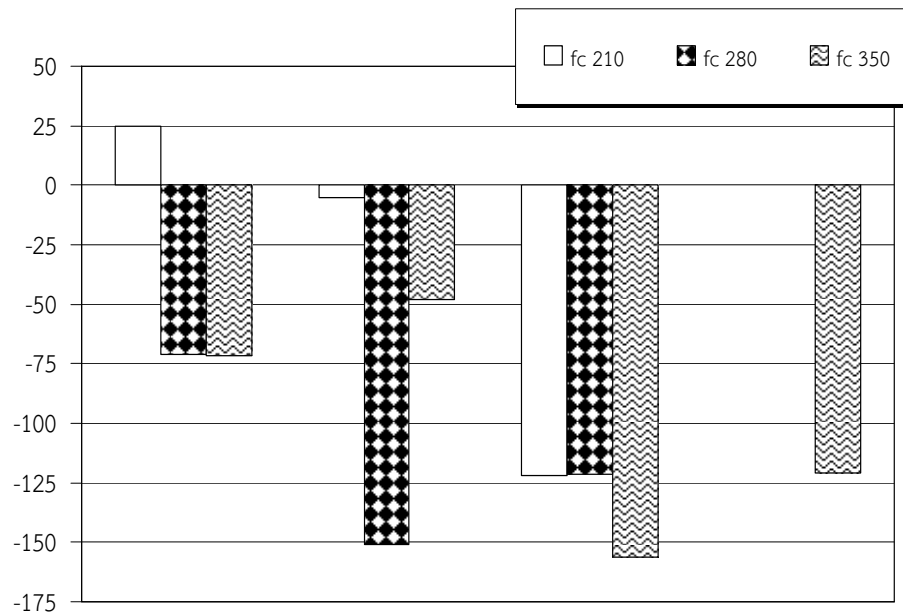


รูปที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับเหล็ก DB12



รูปที่ 5.6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับเหล็ก DB16

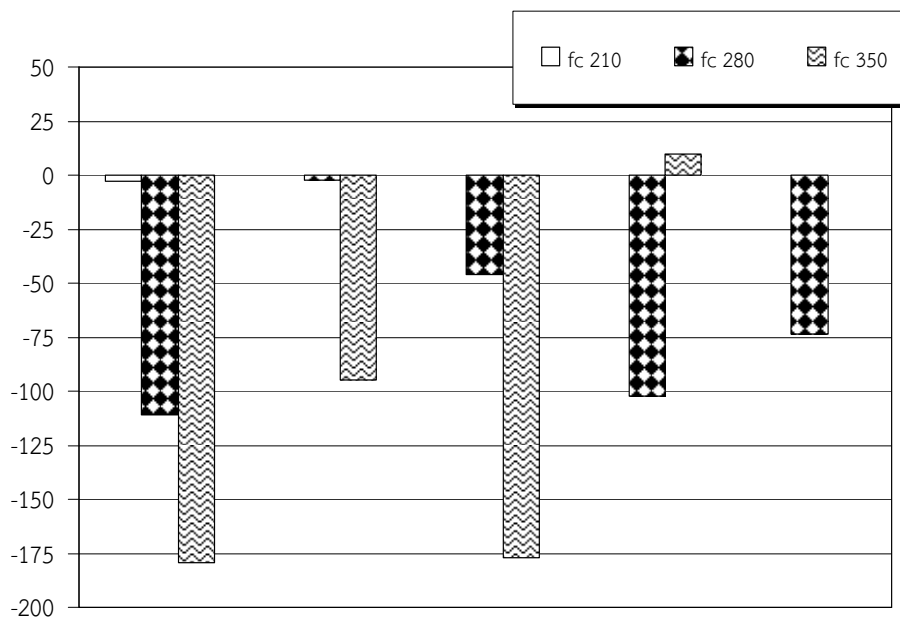
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ



ขนาดเหล็ก DB20

รูปที่ 5.7 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับเหล็ก DB20

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ



ขนาดเหล็ก DB25

รูปที่ 5.8 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการ สำหรับเหล็ก DB25

## บทที่ 6

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กของแท่งเหล็กที่เสียไว้ในแท่งคอนกรีตด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี ขนาดเหล็กที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย RB9 DB12 DB16 DB20 และ DB25 โดยแบ่งระดับการเกิดสนิมของเหล็กออกเป็น 3 ระดับ คือ 15%, 30% และ 50% ของปริมาณเหล็กเสริมเริ่มต้น เมื่อแท่งเหล็กขนาดต่างๆ เกิดสนิมเหล็กถึงระดับที่กำหนดไว้จะนำแท่งคอนกรีตมาทำการกระแทกเพื่อนำเหล็กที่เกิดสนิมมาล้างทำความสะอาด และนำไปชั่งน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่เพื่อนำมาคำนวณหาน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไป จากนั้นเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักเทียบกับค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปด้วยการคำนวณจากสมการพาราเดย์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาในเบื้องต้นได้ดังนี้

- 1) สามารถประยุกต์ใช้วิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กของแท่งเหล็กที่เสียไว้ในแท่งคอนกรีต และวิธีการนี้สามารถจำลองพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมได้ดี
- 2) เมื่อระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยานานขึ้นน้ำหนักของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมที่เหลืออยู่น้อยลง
- 3) สำหรับแท่งเหล็กขนาดเท่ากัน การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านแท่งเหล็ก แต่ส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น
- 4) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเหล็กที่เสียอยู่กับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าวัดค่าได้น้อยกว่าเหล็กที่เสียอยู่กับคอนกรีตที่มีกำลังอัดน้อยกว่าในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาสนิม
- 5) เมื่อเกิดปฏิกิริยาสนิมไปแล้วช่วงเวลาหนึ่ง พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าของเหล็กที่เสียอยู่กับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่ามีค่ามากกว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าของเหล็กที่เสียอยู่กับคอนกรีตที่มีกำลังอัดน้อยกว่า
- 6) เมื่อคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น อาจช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสนิมของเหล็กเสริมที่เสียอยู่ในแท่งคอนกรีตในช่วงต้นๆ ของขบวนการเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามเมื่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว ค่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่มีผลทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาน้อยลงแต่อย่างไร จึงทำให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาของแท่งเหล็กขนาดเท่ากันที่เสียอยู่กับแท่งคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก
- 7) ค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมจากทางทฤษฎีและจากการทดลองมีความแตกต่างกัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมระดับกระแสไฟฟ้าได้ในช่วงแรกของการผ่านกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้การหาน้ำหนักเหล็กเสริมที่เหลืออยู่จากการชั่งน้ำหนักเกิดข้อผิดพลาดขึ้นจากเศษปูนที่ติดอยู่กับผิวเหล็กไม่สามารถขูดออกได้หมดโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อเหล็ก

8) เมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการของเหล็กขนาด RB9 DB12 และ DB16 มีค่าน้อยลง

9) สำหรับเหล็กขนาด DB20 และ DB25 เมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับสมการมีค่าเพิ่มขึ้น

10) สมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปได้ดีพอสมควรสำหรับเหล็กขนาดเล็กกว่า DB12 อย่างไรก็ตามไม่สามารถสรุปได้ว่าสมการพาราเดย์ใช้ประมาณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไปเมื่อเหล็กมีขนาดใหญ่กว่า DB12 ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลจากการทดสอบมีความคาดเคลื่อน ควรมีการทำกรทดสอบเพิ่มเติม

### งานวิจัยที่ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม

- 1) กระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม และปริมาณน้ำหนักของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจากทางทฤษฎี ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการพาราเดย์
- 2) ควรศึกษาขั้นตอนการขัดคอนกรีตออกจากผิวเหล็กที่เป็นสนิม ด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกจากการขัดด้วยหินขัด
- 3) ควรพัฒนาเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- 1) Ahmad, S. H. and Shah, S. P., “Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement.”, ACI Journal, 1982, 79(6), pp 484-490
- 2) Mander, J. B., and Priestly, M. J. N. and Park, R., “Theoretical stress-strain model for confined concrete.”, J. of Structural Engineering Div., ASCE, 1988, 114(8), pp 1805-1826
- 3) Fardis, M. N., and Khalili, H. H., “FRP-encased concrete as a structural material.”, Mag. Concr. Res., 1982, 34(121), pp191-202
- 4) Pantazopoulou, S. J., Bonacci, J. F., Sheikh, S., Thomas, M. D. A., and Hearn N., “Repair of corrosion-damaged columns with FRP wraps.”, J. of Composite for Construction, 2001, Feb., pp 3-11
- 5) Pantazopoulou, S. J., and Papoulia, K. D., “Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures.”, J. of Engineering Mechanics, 2001, April, pp 342-351
- 6) Mirmiran, A., and Shahawy M., “Behavior of concrete columns confined by fiber composites.”, J. of structural Engineering, 1997, May, pp 583-590
- 7) Nanni, A., and Bradford, N. M., “FRP jacketed concrete under uniaxial compression.”, Construction and Building Materials, 1995, V.9(2), pp 115-124
- 8) Shahawy M., and Mirmiran, A., “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns.”, Composites Part B: Engineering, 2000, pp 471-480
- 9) Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy M., “Model of concrete confined by fiber composites.”, J. of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9), pp 1025-1031
- 10) Ramirez, L. J., “Ten concrete column repair methods.”, Construction and Building Materials, 1996, V.10(3), pp 195-202
- 11) MacGregor, J. G., “Reinforced concrete mechanics and design”, 2<sup>nd</sup> Edition, 1992
- 12) บุญไชย สติมันน์ในธรรม, “ พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์”, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ๒๕๔๓, หน้า ๓๑-๓๖, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์



- 13) Sherwood, E., G., Soudki, K., A., “Rehabilitation of corrosion damaged concrete beams with CFRP laminates—a pilot study.”, *Composites Part B: Engineering*, 2000, V.31, pp 453-459
- 14) Nouna, G., Chaudhary, Zia-UL-Hasan, “Reinforced concrete repairs in beams.”, *Construction and Building Materials*, 1999, V.13, pp 195-212
- 15) Ramana, V., P., V., Kant, T., Morton, S., E., Dutta, P., K., Mukherjee, A., Desai, Y., M., “Behavior of CFRPC Strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening.”, *Composites Part B: Engineering*, 2000, V.31, pp 461-470
- 16) Li, G., Hedlund, S., Pang, Su-Seng, Alaywan, W., Eggers, J., Abadie, C., “Repair of damaged RC columns using fast curing FRP composites.”, *Composites Part B: Engineering*, 2003, V.34, pp 261-271
- 17) Kachlakev, D., McCurry, D., D., “Behavior of full-scale reingorced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates.”, *Composites Part B: Engineering*, 2000, V.31, pp 445-452
- 18) สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล. ปัญหาความคงทนของคอนกรีต. การสัมมนาการซ่อมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- 19) จิตพันธ์ ประกอบพร. งานเสริมกำลังพื้นสะพานโดยการใส่แผ่นเหล็กและแผ่นคาร์บอน การสัมมนาวิศวกรรมการทาง ครั้งที่ 2. 2546
- 20) อานนท์ วงษ์แก้ว, “การซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิมด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ.พิษณุโลก 2-4 พฤษภาคม 2550